



下水道におけるメタン発酵によるエネルギー回収の効率化に関する研究

著者	加藤 裕之
号	16
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	環第7号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00123005

氏名	かとう ひろゆき 加藤 裕之
授与学位	博士（環境科学）
学位授与年月日	平成30年3月6日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項

学位論文題目	下水道におけるメタン発酵によるエネルギー回収の効率化に関する研究
--------	----------------------------------

論文審査委員	主査 東北大学教授 李 玉友 東北大学教授 井上千弘 東北大学教授 松八重一代 東北大学准教授 小森大輔
--------	---

論文内容要旨

低炭素社会および循環型社会の構築が求められているという近年の社会的背景から、下水汚泥は下水処理場に大量に集約して存在する廃棄物系バイオマスであり、下水汚泥は循環資源、有価資源であるということが再認識され始めている。また含水率の高い有機性廃棄物の処理に適し、かつ唯一のエネルギー生産型の汚泥処理方法として嫌気性消化が改めて大きな注目を集めている。嫌気性消化による下水汚泥の減量化およびエネルギー利用は循環型社会・低炭素社会の構築および地球温暖化防止の観点からも有用であり、環境負荷の少ない持続可能な環境保全技術として大きく期待されている。近年では、バイオマス・ニッポン総合戦略下水道ビジョン2100などの中で廃棄物系バイオマスである下水汚泥の積極的なエネルギー利用とそれに伴う温室効果ガス排出削減の推進が期待されており、下水汚泥の嫌気性消化によるエネルギー利用の促進に向けた環境が整備されつつある。持続可能な社会、エネルギー自立型下水処理プロセスの確立には下水汚泥のエネルギー資源化および地域から発生する他のバイオマスとの混合による高効率なエネルギー活用、更には従来にはない新たな嫌気性膜分離技術を用いた下水の直接メタン発酵処理などによるエネルギー回収技術の開発必要である。

本研究は、下水道システムを核として自立した地域社会の構築を目指し、地域のバイオマスを活用した自立・分散型エネルギー供給体制の構築およびそれらのメタン発酵によるエネルギー回収の効率化について検討した。本研究は持続可能な下水道システムの構築および低炭素で持続可能な資源循環社会を築く礎となるものである。本論文は全6章から成り、第1章および第2章で研究背景および本研究の目的と意義を述べ、第3章、第4章、第5章で本研究において行った実験結果および考察をまとめ、第6章で総括を行う構成となっている。主な内容は以下の通りである。

第1章「序論」では、人類が向かうべき持続可能な社会、低炭素社会、循環型社会の構築の必要性について述べ、下水道法の改定に伴い注目されている下水処理場におけるエネルギー回収についての課題を提起し、

国内外の技術的動向を踏まえて本研究の背景と位置付けをまとめ、その上で本研究の目的を説明した。また、本論文の内容構成についても概説した。

第2章「下水処理場におけるバイオマスエネルギー利用の現況と課題に関する総説」では、まず「循環の道」下水道における資源回収とエネルギー回収の現況を総説し、メタン発酵を用いたエネルギー回収の意義と実績をまとめた。次に、下水汚泥のメタン発酵原理と運転条件をレビューし、国内の技術開発動向を把握した。それから、現在注目されている汚泥消化の促進技術、メタン回収率の向上を目指した下水処理システムの見直しとバイオマス総合処理、並びに嫌気性 MBR の導入による下水処理方法の根本的変革について研究動向をまとめた。これらの技術動向とわが国の社会状況を踏まえ、下水道分野におけるバイオマスエネルギー回収の戦略的方向性として、地方の小規模施設に適用する廃棄物系バイオマスの総合的利活用のモデルと都市下水処理施設のエネルギー回収に適用する次世代モデルを提示し、研究課題を抽出した。

第3章「小規模自治体における廃棄物系バイオマス資源の総合的利用による下水処理のエネルギー自給率の向上（一大船渡浄化センターにおける実証試験－）」では、地方の小規模自治体において今後し尿処理施設の老朽化に伴い処理の必要性が生じるし尿および浄化槽汚泥を下水処理場に受け入れて混合処理するケースを想定し、エネルギー自給型下水処理場を目指して B-DASH プロジェクトにより開発された超高効率固液分離技術および高効率高温消化技術を導入した地域バイオマス資源の高効率バイオガス化に関する実証試験を大船渡浄化センターにおいて行った。本章では実証試験における各ユニットの運転性能評価および実証データに基づいたフィージビリティスタディにより下水処理場におけるエネルギー自給率に関する検討を行い、下水道システムを核として自立した地域社会を目指し、下水汚泥のエネルギー資源化および地域から発生する他のバイオマスとの混合による効率的なエネルギー活用の可能性について明らかにした。

超高効率固液分離技術および高効率高温消化技術を用い、下水汚泥とし尿および浄化槽汚泥の地域バイオマス資源の混合消化の実証試験を行った結果、以下の結論が得られた。

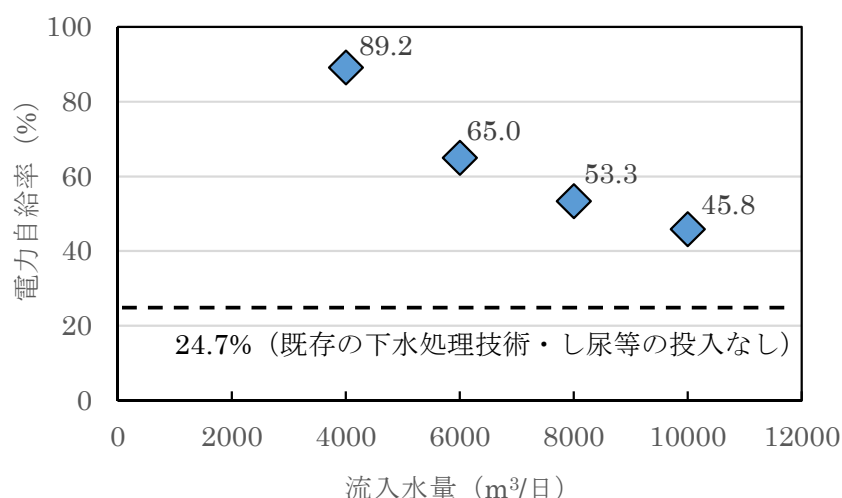


図1 既存の下水処理技術との電力自給率の比較

- (1) 超高効率固液分離装置の導入による BOD および SS の除去率はそれぞれ 33.5%、61.7%であり、既設施設の性能に比べて SS 除去に大幅な効果があることが示された。
- (2) 超高効率固液分離装置により有機物負荷が低下した反応槽流入水の処理水質は BOD 濃度が 4.3mg/L であり既設水処理系列と同等の水質が得られた。
- (3) 下水汚泥とし尿および浄化槽汚泥の混合メタン発酵では下水汚泥単独の場合に比べてバイオガス中のメタン濃度が高くなる傾向が見られた。

実証試験結果に基づくフィージビリティスタディを行った結果、地域で発生するバイオマスのエネルギーポテンシャルを最大限活用することで、将来的に処理水量が 10,000m³/日の時の処理場使用電力の 45.8%を賄うことができることが試算され（図 1）、下水汚泥とし尿等のバイオマスを混合することによる地域での効率的なエネルギー活用の可能性が示された。

第 4 章「嫌気性 MBR 法による都市下水の直接メタン発酵処理に関する実験的研究」では、新しい要素技術の開発を目的として新しい技術の確立を目指した。現在下水処理に適用されている好気性処理は良好な処理水質が得られるものの、曝気にかかるエネルギーコストや処理の過程で発生する温室効果ガス、余剰汚泥発生量などの点から理想な技術とは言えない。近年、嫌気性処理と膜分離技術を組み合わせた嫌気性膜分離法（嫌気性 MBR）という処理方式に注目が寄せられている。この嫌気性膜分離法は嫌気性処理の、処理水質が悪い、菌体の増殖速度が遅いといったデメリットを膜分離技術によって補った画期的技術であり、下水処理分野への適用が期待されている。しかし、この嫌気性膜分離法を用いて実際に実下水を処理した場合、界面活性剤と SS 成分による影響が懸念されている。そこで、本研究では人工下水に界面活性剤やトイレトペーパーを投入して室温条件での連続実験を行った。

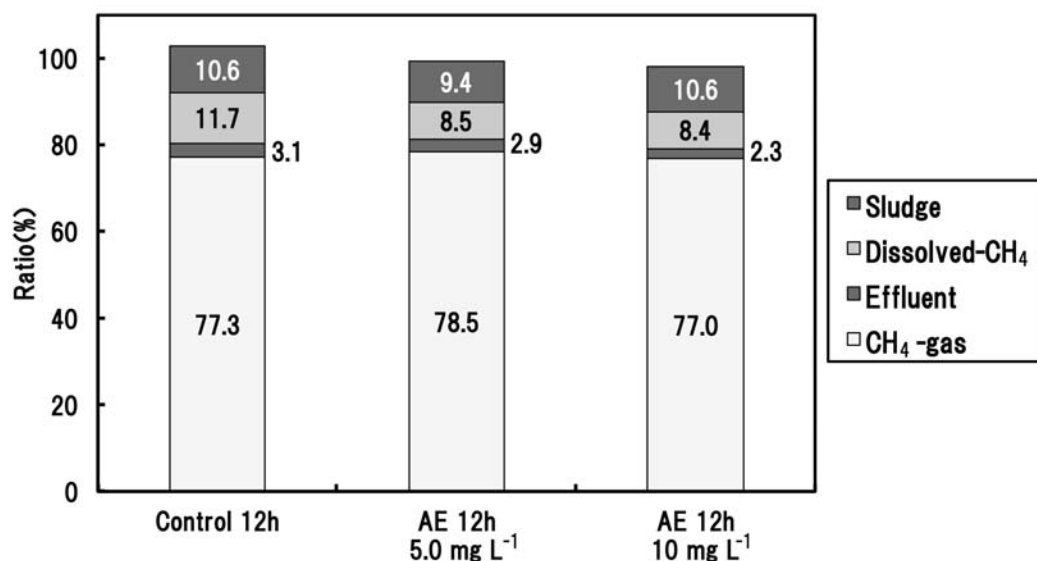


図 2 各運転条件下での COD 物質収支

(1) 嫌気性 MBR による界面活性剤の分解：ラボスケール嫌気性 MBR を用い、水理学的滞留時間や界面活性剤 AE 濃度を变化させて運転を行った。その結果、COD 除去率は AE 濃度 5.0~200 mg/L の条件で 96% 以上であり、有機物除去への阻害は見られなかった。また、AE 除去率は 99% 以上と高く、さらに分解されて最終的にメタンになることが分かった。図 2 の COD 物質収支で示すように、流入水中 COD の約 77% はメタンガスとして回収できる。一方 AE の添加により、膜ファウリングの指標である膜圧増加速度が大きくなった。

(2) 嫌気性 MBR による下水処理におけるトイレペーパーの影響を把握するために、トイレペーパーを含む人工下水の連続実験を行い、水質浄化性能、メタン生成および膜分離機能に及ぼす滞留時間を検討した。安定した処理水質が得られたとともに、トイレペーパーのメタン発酵特性を把握した。嫌気性 MBR においてトイレペーパーはほとんど分解され、全体のメタン発生量の 26% を占めることが分かった。

このように界面活性剤 AE やトイレットペーパーがいずれも嫌気性 MBR によってメタンまで分解されることが明らかになった。

第 5 章では下水処理場におけるバイオマス利活用とエネルギー回収のための注目されるシステムについて比較検討を行った。下水処理場において、現行の標準活性汚泥法と汚泥の嫌気性消化を組合せることで、ある程度エネルギー回収できることが知られている。都市下水処理におけるエネルギー回収の更なる効率化を図るために、これまでの技術開発から幾つかの新しい設計が考えられる。そこで本研究ではこれまでの研究開発を踏まえ、考えられる下記 5 つのエネルギー回収システム：

- ① 標準活性汚泥法+汚泥嫌気性消化
- ② 最初沈殿が強化された活性汚泥法 (FeCl_3 による沈殿促進) + 汚泥の嫌気性消化
- ③ 標準活性汚泥法+前熱処理を導入した高効率汚泥消化,
- ④ 下水汚泥に生ごみを添加した混合メタン発酵システム
- ⑤ 嫌気性 MBR による下水の直接メタン発酵処理システム

におけるエネルギー回収量、汚泥減量化率、コストなどの評価を行い、システムの比較検討を行った。その結果、下水処理場におけるエネルギー自給率向上のために、嫌気性 MBR 法の導入またはその他のバイオマスとの Co-digestion が効果的であることが明らかになった。

第 6 章では、本研究を通して得られた具体的な結論を総括したとともに、下水道におけるメタン発酵によるエネルギー回収の応用推進について展望した。

本研究の新規ポイントは地方の小規模施設に適用する廃棄物系バイオマスの総合的利活用(co-digestion)のモデルと都市下水処理施設のエネルギー回収に適用する次世代モデル「嫌気性膜分離法」を提示し、独自の試験結果に基づきそれぞれのエネルギー回収効率を評価したことで、エネルギー回収の効率と推進方向性を示したことである。本研究の成果は下水処理システムの革新に大きく貢献するものである。

論文審査結果の要旨

本論文は、下水道システムを核としたエネルギー回収の効率化を目指して、高効率メタン発酵による下水汚泥または下水からのエネルギー回収技術および地域のバイオマスを総合的に活用するエネルギー回収システムについて検討したものである。内容は6章から構成されている。

第1章「序論」では本研究の背景、研究の目的と意義を説明し、本論文の構成について述べた。

第2章「下水処理場におけるバイオマスエネルギー利用の現況と課題に関する総説」では、まず下水道における資源回収とエネルギー回収の現況を総説し、メタン発酵を用いたエネルギー回収の意義と実績をまとめた。また汚泥消化の促進技術、メタン回収率の向上を目指した下水処理システムの見直しとバイオマス総合的利用、並びに嫌気性 MBR の導入による下水処理方法の根本的変革について研究動向をまとめ、研究課題を抽出した。

第3章「小規模自治体における廃棄物系バイオマス資源の総合的利用による下水処理のエネルギー自給率の向上（一大船渡浄化センターにおける実証試験－）」では、新規技術の実証試験および実証データに基づいたフィージビリティスタディにより下水処理場におけるエネルギー自給率に関する検討を行い、下水汚泥のエネルギー資源化および地域から発生する他のバイオマスとの混合処理による効率的なエネルギー活用の可能性について考察した。

第4章「嫌気性 MBR 法による都市下水の直接メタン発酵処理に関する実験的研究」では、人工下水に界面活性剤やトイレットペーパーを投入して室温条件における界面活性剤 AE やトイレットペーパーの分解と影響を検討した。その結果、界面活性剤 AE やトイレットペーパーがいずれも嫌気性 MBR によってメタンまで分解されることを明らかにした。

第5章「下水処理場におけるバイオマス利活用とエネルギー回収システムの比較」では、下水処理場におけるエネルギー回収のために注目される5つのシステムについてエネルギー回収量、汚泥減量化率、薬品コストなどの比較評価を行うことで、嫌気性 MBR 法の導入またはそのその他のバイオマスとの混合処理が効果的であることを示した。

第6章では、本研究を通して得られた結果を総括し、今後の展望について述べている。

本研究の新規ポイントは地方の小規模施設に適用するモデルと都市型下水処理施設のエネルギー回収に適用する次世代技術「嫌気性膜分離法」を提示し、独自の試験結果に基づきそれぞれのエネルギー回収効率を評価したことにある。本研究の成果は循環型社会の構築や下水処理システムの革新に大きく貢献するものであり、環境科学の発展に寄与するところは少なくない。

よって、本論文は博士(環境科学)の学位論文として合格と認める。